

ANALISI DINAMICA MULTIBODY DI UN MOTOCICLO CON TELAIO INNOVATIVO IN LEGA DI TITANIO

G. Colline, G. Virzi Mariotti^a

Dipartimento di Meccanica Università di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo, Italy ^a E-mail virzi@dima.unipa.it

Parole Chiave: Simulazione multibody, telaio di motociclo, lega di Titanio

Sommario

Il presente lavoro descrive la progettazione di un telaio in titanio a traliccio per la motocicletta della YAMAHA modello YZF-R1 dell'anno 1998-2000. Dopo il necessario studio bibliografico sulla dinamica della motocicletta, la progettazione ha richiesto l'acquisizione dei dati geometrici e tecnici della moto in esame, costruzione di un telaio virtuale e l'esecuzione di prove su strada virtuali del sistema multibody costituito dal motociclo. Dai diagrammi del rollio massimo, della coppia di sterzo massima, dell'angolo di sterzo, dell'angolo di deriva, del raggio di curvatura minimo, si evince che il telaio più performante è quello costituito da tubi tondi in titanio con spessore di 1,5 mm, pur essendo quello maggiormente sollecitato, sia in termini di tensione che di deformazioni.

Abstract

This paper describes the design of a chassis in titanium for the motorcycle YAMAHA model YZF-R1 of the year 1998-2000. After the necessary bibliographic study, the design required the knowledge of geometrical and technical data of the motorcycle, the building of a virtual chassis and the execution of road test of the multibody system constituted by the motorcycle. Examining the test result on maximum roll, maximum steering couple, steering angle, derive angle, minimum curve radius, one can note that the best performance chassis is constituted by round pipes in titanium with 1.5 mm thickness, though it is very solicited both in term of stress and strain.

1. Introduzione

La motocicletta è un sistema complesso, oggetto di numerosi studi analitici e dinamici. In passato il maggiore interesse era suscitato dal motore, successivamente si sono studiati elementi quali il telaio, le sospensioni e le ruote. La classica prova su strada è il metodo più diffuso per analizzare la dinamica della motocicletta in termini di maneggevolezza e stabilità direzionale, e cioè per studiarne l'assetto e valutare l'influenza delle caratteristiche cinematiche sulla stabilità del veicolo, ma i risultati sono influenzati dallo stile di guida del pilota, richiedendo un notevole dispendio di tempo e di denaro. Al giorno d'oggi le interazioni dinamiche fra tutti gli elementi del motociclo vengono studiate per mezzo dei moder-

ni sistemi di analisi dinamica computerizzati; questa è la strada più rapida ed economica per approfondire lo studio dei veicoli. Lo scopo è quello di valutare le forze che dinamicamente intervengono a sollecitare le diverse parti, allo scopo di verificare le condizioni di rigidità e resistenza.

Il presente lavoro descrive la progettazione di un telaio in titanio a traliccio per la motocicletta della YAMAHA modello YZF-R1 dell'anno 1998-2000, sostituendo la struttura originale Deltabox II su proposta di una ditta specializzata. Dopo il necessario studio bibliografico sulla dinamica della motocicletta, lo studio è stato organizzato nel seguente modo:

- acquisizione dei dati geometrici e tecnici della moto in esame e costruzione di un telaio virtuale.
- prove su strada virtuali del sistema multibody della motocicletta.

L'analisi dinamica dei sistemi "multibody" consiste nello studio del comportamento cinematico e dinamico di sistemi meccanici composti da più membri, variamente articolati tra di loro. La geometria è stata realizzata con il software Solid Edge, successivamente importata sul software di analisi dinamiche Visual Nastran 4D della MSC Working Knowledge, per mezzo del quale se ne è eseguita l'ottimizzazione strutturale.

2. Il telaio

Il telaio di una motocicletta ha una funzione statica e una funzione dinamica. Il telaio ha il compito di sostenere la moto e tutti i suoi accessori, di fare da supporto per le sospensioni, e di reggere anche il motore. È una struttura monolitica (priva cioè di snodi) che ha il compito di collegare la parte anteriore e quella posteriore. Ad esso sono uniti la sospensione posteriore tramite un forcellone, ed una forcella anteriore che ha la funzione di sterzo e di sospensione. Assieme alle ruote, sospensioni e volante, il telaio provvede alla precisione della sterzata, alla tenuta di strada, all'aderenza in frenata, alla maneggevolezza e al com-



Fig. 1 – Telaio a traliccio

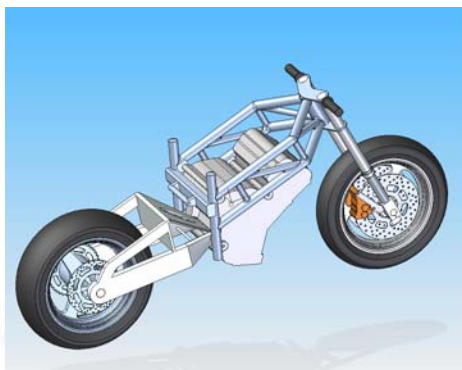


Fig. 2 - Assemblato motocicletta.

fort di guida. Se al motore è demandato il compito di muovere un qualsiasi mezzo, la ciclistica (telaio, sospensioni, ruote ecc.) ha quello non meno impegnativo di trasmettere la potenza al terreno. Inoltre il comfort di guida è importante per minimizzare la fatica del pilota, e richiede principalmente che le sospensioni assorbano al meglio le asperità della strada e gli urti.

La progettazione del telaio è di fondamentale importanza per la prestazione di una motocicletta da corsa: esso deve infatti, garantire rigidità, resistenza e leggerezza. Tali requisiti sono tra loro in contrapposizione, in quanto, in assenza di una attenta progettazione, un aumento della rigidità corrisponde ad un aumento del peso. Fra i diversi tipi il telaio a

traliccio (fig. 1) compete per rigidità e leggerezza col telaio perimetrale in alluminio, è facile da realizzare e risulta tanto resistente quanto il telaio perimetrale.

2.1 Il titanio

All'incirca il 95% del titanio viene consumato in forma di biossido di titanio (TiO₂), un pigmento intensamente bianco e permanente con buona capacità coprente, nelle vernici, nella carta e nelle plastiche. Il titanio richiede particolari attenzioni nella saldatura. Infatti ha la caratteristica di legarsi facilmente con l'ossigeno perdendo in tutto o quasi le sue splendide caratteristiche meccaniche. E' questa la ragione per cui i costruttori più accorti ricorrono alla campana sotto vuoto per saldare i tubi. La caratteristica più apprezzata del titanio, accanto alla leggerezza e alla resistenza, è la durata. Un buon telaio in lega di titanio è praticamente eterno, non subisce l'usura del tempo nè la corrosione atmosferica, non cambia le sue caratteristiche meccaniche, non si usura. Le aziende che lo adoperano come materiale per i telai spesso offrono garanzia a vita.

Tab. 1 - Proprietà Fisiche del titanio	
Densità	4.43 g/cc
Durezza Brinell	379
Resistenza a rottura	1170 MPa
Resistenza allo snervamento	1100 MPa
Allungamento alla rottura	10 %
Modulo di elasticità	114 GPa
Resistenza allo snervamento in compressione	1070 MPa
Modulo di Poisson	0.33
Resistenza a fatica	160 MPa 1. E+7 cicli; K _t = 3.3
Modulo di taglio	44 GPa
Modulo di rottura	760 MPa

2.2 Modello della Yamaha YZF R1 2000

Il modello della Yamaha YZF R1 2000 è stato costruito in modo da mantenere tutte le dimensioni originali. Dimensioni (in mm) e peso: interasse 1395 mm, lunghezza 2035 mm, larghezza 695 mm, altezza sella 815 mm. Peso a secco 175 kg. Prestazioni dichiarate: potenza 110,3 kW a 10.000 giri, coppia 108 Nm a 8500 giri.

La motocicletta è stata suddivisa in componenti principali: cerchioni e pneumatici anteriori e posteriori, asse ruote anteriore e posteriore, forcellone oscillante posteriore, telaio, motore, manopole, manubrio, piastra sterzo, cannotti sterzo destro e sinistro, steli forcella sinistro e destro. Questi elementi sono stati disegnati in 3D utilizzando il software Solid Edge e successivamente importati e assemblati in Visual Nastran 4D. Tutti i componenti della motocicletta escluso il telaio, sono stati considerati come corpi rigidi, che si scambiano le forze reattive attraverso una serie di coordinate accoppiate e vincolate tra di loro. In fig. 2 è rappresentato il modello assemblato della motocicletta.

Il collegamento tra la ruota anteriore e il rodiggio e quello tra la ruota posteriore e il forcellone oscillante sono stati realizzati tramite due vincoli *Revolution Joint – constraint*, essi inibiscono tutti i gradi di libertà delle ruote tranne la rotazione intorno al proprio asse. Il collegamento tra il forcellone oscillante e il telaio è stato effettuato tramite un *Revolvute Joint*, che simula la rotazione attorno al perno che collega i due elementi, e un *Linear Spring/Damper Joint* che simula l'ammortizzatore. Il *Revolvute Joint* esplica sul telaio un carico distribuito, mentre il *Linear Spring/Damper Joint* esplica una forza concentrata nella coordinata del vincolo. Il collegamento telaio sterzo è stato simulato tramite un vincolo

simile al Revolute Joint, ma che in più applica una molla/smorzatore alla rotazione. Esso, denominato *Revolute Spring/Damper Joint*, consente la rotazione attorno all'asse dello sterzo, e allo stesso tempo simula un ammortizzatore/smorzatore torsionale che attenua le forze che si esplicano tra le superfici di contatto del telaio con la piastra dello sterzo. Si è dovuto inserire lo smorzatore per limitare la rotazione della parte anteriore della motocicletta quando la ruota anteriore non aderisce alla strada. L'accoppiamento tra il rodiggio e lo sterzo deve simulare il comportamento cinematico e dinamico della forcella telescopica, gli steli della forcella sono stati collegati ai rispettivi foderi tramite due vincoli denominati *Linear Spring/Damper*, essi consentono lo scorrimento delle masse non sospese lungo l'asse della forcella e simulano il comportamento dei due gruppi molla – smorzatore presenti all'interno dei foderi. I valori della rigidità, posizione e lunghezza naturale sono stati ricavati dalla bibliografia, i coefficienti di smorzamento a compressione ed estensione sono quelli utilizzati da una motocicletta dell'Aprilia di 1000 cc avente caratteristiche simili. Gli ammortizzatori possono essere personalizzati modificando la legge caratteristica e il valore della costante di smorzamento; utilizzando una funzione logica è possibile riprodurre il comportamento degli ammortizzatori a doppio effetto impostando due differenti valori della costante in compressione ed in estensione.

3. Le forze

La forza di resistenza aerodinamica è applicata sull'assemblaggio posteriore in corrispondenza del baricentro del motociclo. Il modulo della forza è:

$$F_a = 0,28V_0^2 \quad (1)$$

dove V_0 indica la velocità orizzontale del baricentro della motocicletta.

La coppia allo sterzo, necessaria per ruotare il manubrio che permette di effettuare la sterzata, è applicata sull'asse di rotazione della piastra dello sterzo rispetto al telaio. Il modulo della coppia è:

$$C_s = -K_s(\varphi_{teor} - \varphi) + K_{sd}\Delta V \quad (2)$$

con K_s costante e pari a 100, φ angolo di rollio, φ_{teor} angolo di rollio teorico, ΔV differenza di rollio tra due step successivi diviso il tempo intercorso fra due step.

L'effetto del tiro catena è stato riprodotto tramite un vincolo *Linear Actuator*, che consente di applicare una forza tra due punti alle proprie estremità, corrispondenti in questo caso ai punti di tangenza del ramo teso della catena di trasmissione con il pignone calettato sull'albero motore e la corona solidale alla ruota posteriore. Il modulo è:

$$T_c = -S_p R_p / r_c \quad (3)$$

con S_p spinta di trazione sulla ruota posteriore, R_p raggio della ruota posteriore e con r_c raggio della corona.

Le componenti della forza di spinta sono espresse in modo che essa risulti sempre parallela al terreno e sia contenuta nel piano di simmetria della ruota. Per il calcolo delle spinte si è usata l'espressione:

$$S = I \frac{\alpha}{R} + \left(S_p - I \frac{\alpha}{R} \right) e^{-t/0,25} \quad (4)$$

con I momento d'inerzia, α accelerazione angolare, R raggio della ruota, S_p spinta di trazione. La forza laterale, sempre espressa in coordinate globali, risulta parallela al terreno e ortogonale alla precedente ed è la somma della forza di rollio e di deriva:

$$F = K_{roll}\varphi + K_{der}\lambda \quad (5)$$

con K_{roll} e K_{der} si sono indicate le rigidità di rollio e deriva e con φ e λ i rispettivi angoli di rollio e deriva.

Sul mozzo ruota sono applicati anche tre momenti, diretti secondo gli assi della terna SAE solidale ai pneumatici, essi rappresentano la somma delle componenti, nelle tre direzioni, dei momenti di contatto con il terreno e dei momenti dovuti al trasferimento del punto di applicazione delle forze.

4. Il controllo

4.1 Simulazione dinamica

Nella realtà il controllo dinamico del motoveicolo è affidato all'intervento del pilota che tramite lo sterzo, il comando del gas e l'impianto frenante riesce a governare il motociclo per eseguire le manovre richieste.

La funzione del controllo è quella di simulare i movimenti del pilota al fine di eseguire una determinata manovra. Supposto il pilota in posizione fissa, le funzioni principali sono quelle di fornire la coppia che permette la trazione, la coppia di frenata per mantenere una velocità costante e la coppia di sterzo per effettuare le manovre in curva.

Poiché *Visual Nastran* non è in grado di implementare tali funzioni, si è resa necessaria la stesura di un programma di controllo in *Visual Basic* in grado di interagire con *Visual Nastran* mediante la tecnologia *OLE Automation (Object Linking and Embedding)*. La tecnologia *OLE* è una caratteristica fondamentale della programmazione ad oggetti propria di *Visual Basic* e dei programmi che operano in ambiente *Microsoft Windows*, essa consiste in un sistema che si integra con il sistema operativo consentendo l'interazione, basata sulla logica *Client-Server*, tra diverse applicazioni dotate di interfaccia *OLE*. Grazie a questa tecnologia il programma in *Visual Basic (Client)* è in grado di controllare la simulazione in *Visual Nastran (Server)*, acquisendo dati mediante gli oggetti *Meters* e modificando i parametri dell'analisi mediante gli oggetti *Inputs*. Il programma di controllo è dotato di una *Interfaccia grafica* che consente all'utente di impostare alcuni dei parametri caratteristici della simulazione e del modello. Il corpo del programma può essere suddiviso in moduli:

- *Modulo di assegnazione variabili* che assegna una corrispondenza univoca tra le variabili di visual basic e gli oggetti *Inputs* e *Meters*.
- *Modulo di acquisizione* che svolge il compito di importare i dati della simulazione da *Visual Nastran*, quali posizione, velocità, velocità angolare, accelerazione e accelerazione angolare.
- *Modulo di elaborazione* che elabora i valori acquisiti per calcolare le grandezze cinematiche e dinamiche caratteristiche del moto.
- *Modulo di calcolo delle forze* che ha il compito di calcolare le forze agenti sul modello
- *Modulo di controllo* che garantisce al modello stabilità e direzionalità simulando l'azione del pilota.

4.2 Interfaccia grafica

L'interfaccia grafica del programma è stata suddivisa in finestre, o fogli di lavoro, in funzione degli elementi che si vogliono modificare. Si è scelto di usare i fogli di lavoro in fig. 3.



Fig. 3 - Finestre per il controllo della simulazione, delle sospensioni e degli pneumatici.

L'elaborazione inizia assegnando le variabili, acquisendo la posizione del sette corpi rigidi che costituiscono il motociclo, quindi si passa al calcolo di grandezze cinematiche e forze. A questo punto il modulo di controllo fa in modo che il veicolo esegua la manovra desiderata rispettando i parametri impostati dall'utente nell'apposita finestra di dialogo. Il codice simula l'azione del pilota controllando la stabilità e la direzionalità del veicolo agendo sulla coppia di sterzo, sulla forza frenante e sulla spinta. Secondo la manovra impostata, il programma di controllo elabora l'andamento nel tempo dell'angolo di rollio desiderato, ad ogni intervallo di integrazione il codice confronta il valore del rollio attuale del veicolo con quello desiderato e in caso di discrepanza effettua una correzione della traiettoria, applicando allo sterzo una coppia calcolata secondo la seguente formula:

$$\tau_s = k \cdot (\varphi_d - \varphi) + c \cdot \frac{\partial(\varphi)}{\partial t} \quad (6)$$

in cui φ è il valore dell'angolo di rollio attuale, φ_d il valore del rollio desiderato, k e c sono le costanti di proporzionalità, del primo e del secondo ordine rispettivamente, del sistema di controllo. In modo analogo il software controlla la velocità di avanzamento del veicolo confrontandola con quella impostata dall'utente. Se la velocità è superiore a quella desiderata, il controllo applica una forza frenante sull'avantreno facendo rallentare il veicolo, in caso contrario aumenta il valore della spinta agente sulla ruota posteriore per farlo accelerare.

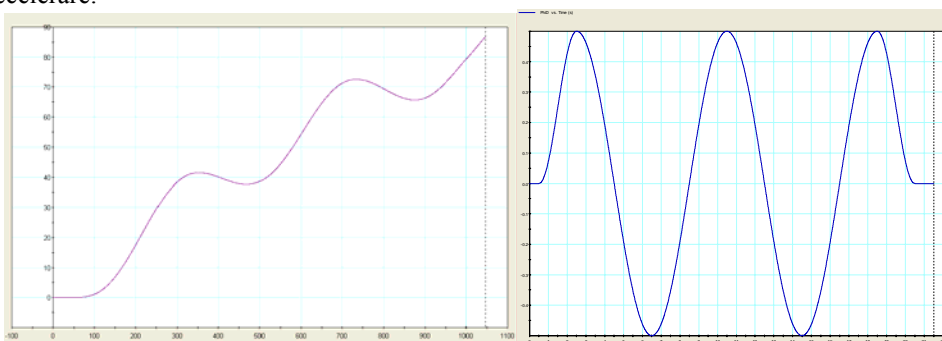


Fig. 4 - Traiettoria tipica di una manovra di slalom e grafico dell'angolo di rollio teorico.

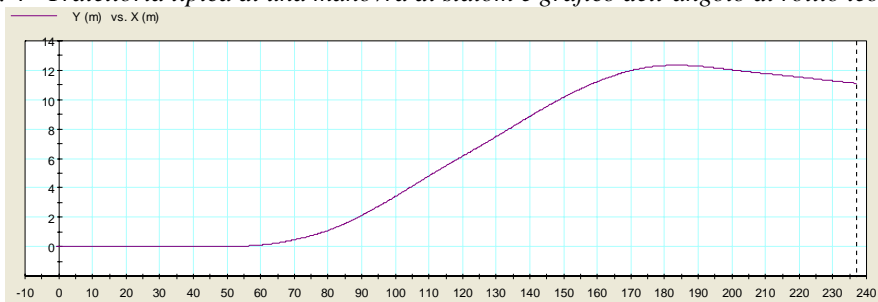


Fig. 5 - Traiettoria tipica di una manovra di lane change.

5. Le manovre tipiche

Lo *slalom* (fig. 4) consiste nell'inclinare il motociclo di un angolo prefissato alternativamente a sinistra e a destra, mantenendo costante la velocità di avanzamento.

Durante la manovra di *lane change* (fig. 5) il veicolo, inizialmente in moto rettilineo uniforme, effettua un improvviso scarto laterale portandosi lungo una direzione di avanzamento parallela alla precedente. Il motociclo viene rapidamente inclinato prima da un lato

per effettuare lo spostamento laterale e poi da quello opposto in modo da riportarlo lungo la direzione di avanzamento parallela a quella iniziale.

Durante la manovra di *steady turn* (fig. 6) il motociclo, inizialmente in moto rettilineo uniforme, viene inclinato lateralmente per percorrere una curva a velocità e angolo di rollio costanti, al termine della manovra il veicolo viene riportato in posizione verticale.

Si è scelto di eseguire tutte le prove alla velocità di 50 m/s, con un angolo di rollio massimo di 0,6 rad e step di integrazione di 0,005 s.

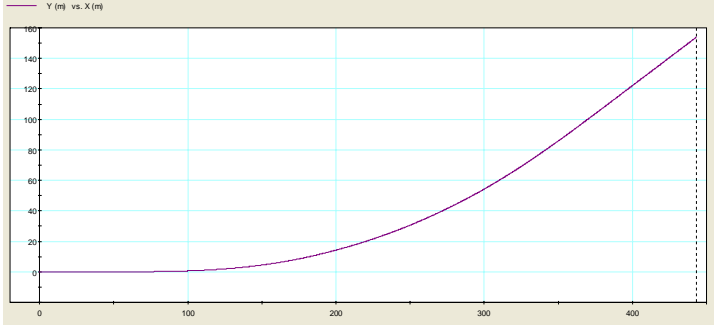


Fig. 6 - Traiettoria tipica di una manovra di lane change.

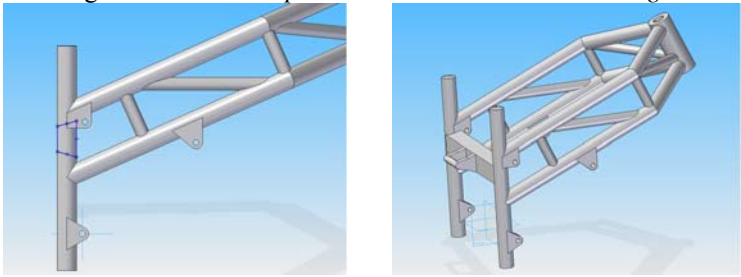


Fig. 7: Sezione della barra trasversale e vista del telaio definitivo con tubi tondi pieni.

Tab. 2 – Simulazioni effettuate con Visual Nastran

Sigla	Simulazioni Telaio	Slalom	Change Lane	Steady Turn
TMpT	Tubi pieni, Titanio	SI	SI	SI
TMpA	Tubi pieni, Alluminio	SI	SI	SI
TM5mm	Tubi cavi, 5mm	SI	SI	SI
TM3mm	Tubi cavi, 3mm	SI	SI	SI
TM1.5mm	Tubi cavi, 1.5mm	SI	SI	SI

6. Analisi numeriche

Si è disegnato un telaio a traliccio di tubi tondi che rispettasse le distanze fondamentali del telaio originale. Si è mantenuto invariato l’interasse della moto, l’angolo di inclinazione del telaio, dello sterzo e la dimensione trasversale massima nella quale viene alloggiato il motore. Il modello creato è in stile naked, quindi la motocicletta non presenta nessuna carenatura, simmetrico rispetto alla sezione longitudinale di mezzeria; è costituito da tubi tondi di diametro esterno di 1 ½ e 1 pollice (misure commerciali), la scelta dello spessore è eseguita in base alle prove di simulazione di manovre tipiche di slalom, lane change e steady turn. Per il modello del telaio base, utilizzato come partenza per un successivo miglioramento della forma e nell’applicazione di un opportuno diametro interno, si è scelto di usare dei tubi pieni tondi in titanio. Poiché la barra trasversale era eccessivamente sollecitata

ta, nel modello definitivo (fig. 7), essa presenta una sezione trapezoidale, con le basi in posizione verticale, posta in corrispondenza dei tubi verticali posteriori.

Per determinare il diametro interno dei tubi tondi si sono effettuate le simulazioni di manovre di slalom, lane change e steady turn col telaio con tubi pieni, e con tubi di spessore di 5 mm, 3 mm, 1.5 mm. Inoltre si è analizzato anche il telaio a tubi pieni in alluminio. La tab. 2 riepiloga le prove effettuate in ambiente Visual Nastran.

In fig. 8 è mostrato un esempio delle tensioni di Von Mises e degli spostamenti durante la manovra di slalom, nel corso della quale il motociclo è maggiormente sollecitato.

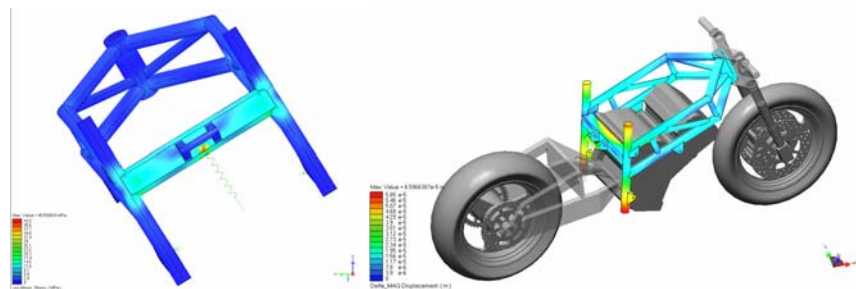


Fig. 8: Tensioni di Von Mises e spostamenti, tubi pieni, titanio. Frame di max rollio.

7. Risultati

7.1 Angolo di Rollio

Tutti e cinque i telai presentano un angolo di rollio massimo tra il frame 2110 e il 2120, zona in cui si ha il massimo rollio teorico imposto dalla simulazione. In fig. 9 sono riportati i valori dell’angolo di rollio massimo delle simulazioni di slalom dei cinque differenti telai.

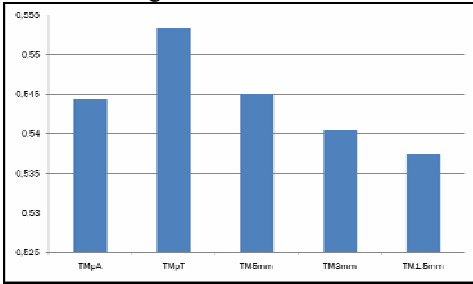


Fig. 9 Angolo di rollio massimo. [Rad]

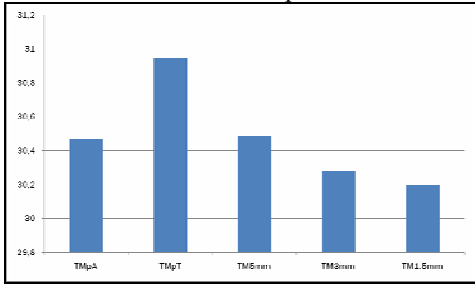


Fig. 10 Coppia di sterzo massima.[Nm]

L’angolo di rollio massimo del telaio con tubi pieni in alluminio è di poco inferiore a quello del telaio con tubo in titanio con spessore di 5 mm. Dei cinque telai il migliore è quello con tubo cavo in titanio con spessore di 1,5 mm; esso risulta più leggero, più elastico, più preciso e reattivo nelle manovre.

7.2 Coppia di sterzo

Tutti e cinque i telai presentano una coppia di sterzo massima, applicata al manubrio, tra il frame 2465 e il 2480, a circa metà simulazione di slalom. Al diminuire dello spessore dei tubi tondi (fig. 10), e quindi all’aumentare dell’elasticità del telaio, diminuisce la coppia di sterzo che il pilota deve applicare sul manubrio per affrontare le curve, ciò implica una minore fatica nella guida, essendo la motocicletta più maneggevole. La coppia di sterzo massima del telaio con tubi pieni in alluminio è di poco inferiore a quello del telaio con tubi in titanio di spessore di 5 mm. Il telaio con tubo cavo in titanio di spessore 1,5 mm, è più leggero e più elastico.

7.3 Angolo di sterzo

Tutti e cinque i telai presentano un angolo di sterzo massimo, definito come la differenza della direzione della ruota posteriore e quella anteriore, tra il frame 2480 e il 2505.

Al diminuire dello spessore dei tubi tondi (fig. 11), e quindi all'aumentare dell'elasticità del telaio, aumenta l'angolo di sterzo. Ciò implica che la moto può affrontare curve di raggio più piccolo. L'angolo di sterzo massimo del telaio con tubi pieni in alluminio è di poco superiore a quello del telaio con tubo in titanio con spessore di 5 mm. Il telaio con tubi cavi in titanio di spessore di 1,5 mm è più leggero e capace di affrontare curve più strette.

7.4 Raggio di curvatura minimo

Al diminuire dello spessore dei tubi tondi (fig. 12), e quindi all'aumentare dell'elasticità del telaio, diminuisce il raggio di curvatura minimo. Un raggio di curvatura minore, implica che la moto può affrontare curve più strette. Il raggio di curvatura minimo della moto con il telaio con tubi pieni in alluminio è di poco inferiore a quello del telaio con tubo in titanio con spessore di 5 mm. Il telaio migliore è quello con tubi di spessore di 1,5 mm.

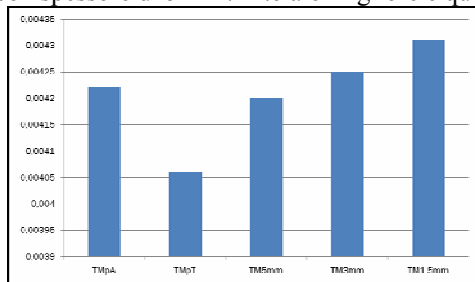


Fig.11 Angolo di sterzo massimo.[Rad]

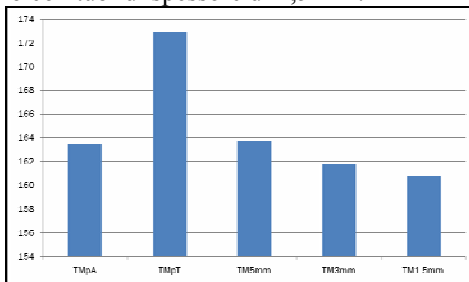


Fig. 12 Raggio di curvatura minimo.

7.5 Angolo di deriva

Al diminuire dello spessore dei tubi tondi, e quindi all'aumentare dell'elasticità del telaio, diminuiscono gli angoli di deriva posteriore (fig. 13) e anteriore (fig. 14). Al diminuire degli angoli di deriva, la moto mantiene meglio la traiettoria impostata dal pilota. La sensazione del pilota è quella di una maggiore precisione di guida. Il telaio migliore è quello con tubo cavo in titanio con spessore di 1,5 mm.

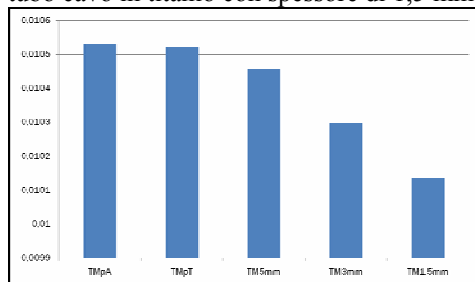


Fig. 13 Deriva posteriore massima.[Rad]

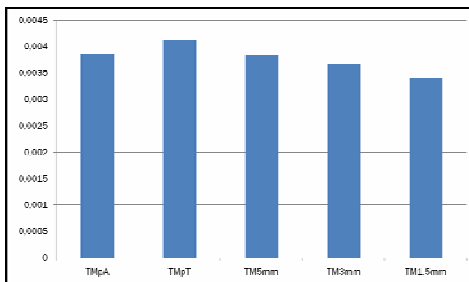


Fig. 14 Deriva anteriore massima.[Rad]

7.6 Peso e sollecitazioni

Al diminuire dello spessore dei tubi tondi, e quindi del volume di materiale, diminuisce il peso del telaio. Un peso complessivo minore implica che a parità di prestazione, la moto può portare un carico maggiore. Il telaio con tubi di sezione di 1,5 mm risulta il migliore dal punto di vista del peso, mentre il telaio in titanio con tubi pieni risulta il migliore sia in termini di tensioni di Von Mises che di deformazione.

8. Conclusioni

Dai diagrammi del rollio massimo, della coppia di sterzo massima, dell'angolo di sterzo, dell'angolo di deriva, del raggio di curvatura minimo, si evince che il telaio di migliori prestazioni è quello costituito da tubi tondi in titanio con spessore di 1,5 mm, mentre questo

è quello maggiormente sollecitato, sia in termini di tensione che di deformazioni. La tensione massima, pari a 122,43 MPa, nella manovra di slalom (fig. 8) è ben al di sotto della tensione di snervamento pari a 1100 MPa (tab. 1); il telaio risulta pertanto abbondantemente in sicurezza. La stessa tensione è anche inferiore al limite di durata a 10^7 cicli con concentrazione di tensione pari a $K_t=3,3$, pari a 160 MPa, pertanto appare scongiurata ogni evenienza per la sollecitazione di fatica. Le deformazioni si mantengono al di sotto del decimo di millimetro nelle zone estreme delle traverse verticali dove si allaccia il telaio della coda. L'adozione del telaio con tubi di tale spessore ha come unico effetto negativo il fatto che in caso di una accidentale perturbazione delle condizioni generali di marcia, la motocicletta impiega più tempo a smorzare le sollecitazioni. Tale inconveniente può agevolmente essere risolto studiando un apposito sistema di ammortizzatori anteriore e posteriore.

Bibliografia

- [1] V. Cossalter: *Cinematica e dinamica della motocicletta*, Edizioni Progetto, Padova, 2001
- [2] G. Cocco: *Dinamica e tecnica della motocicletta*, Giorgio Nada editore, Vimodrone, 2001
- [3] M. Coombs, P. Matter: *YAMAHA YZF-R1 Service & repair manual*, Haynes Publishing, Sparkford, 2005
- [4] V. Cossalter, R. Lot: *A motorcycle multibody model for real time simulation based on the natural coordinates approach*, Vehicle System Dynamics 2002, Volume 37 n.6, pp 423-447, Swets & Zeitlinger Publisher, Lisse, Netherlands
- [5] R. Beritta, F. Biral, S. Garbin: *Evaluation of motorcycle handling with multibody modelling and simulation*, High tech engine and cars, 6° International conference, Modena, 2002
- [6] F. Giannitrapani, G. Virzi Mariotti, *Dynamic Analysis of Motorcycle Behaviour on the Road with Steering Plate Structural Optimisation*, European Automotive Engineers Co-operation Conference, Belgrade, 30th May, 1st June 2005
<http://www.atnet.it/lista/EAEC05YU-AS10.pdf>
- [7] L. Mittolo, R. Beritta, S. Garbin: *Virtual prototyping of motorcycles with lms.dads and Msc.Visual Nastran multibody codes: evaluation of performance in typical manoeuvres*: European automotive congress 1999, Barcellona
- [8] E. J. H de Vries, H. B. Pacejka: *The effect of tire modelling on the stability analysis of a motorcycle*. AVEC 1998, Nagoya, Japan, 1998
- [9] M. Da Lio, V. Cossalter, R. Lot, L. Fabbri: *The influence of tyre characteristic on motorcycle manoeuvrability*, European Automotive Engineering Conference, 1999, Barcellona
- [10] G. Polucci, G. Guerra, *Dimensionamento di un telaio di motocicletta: modello di simulazione e risultati di calcolo*, MotoTecnica vol. 17 N.6, N.P.M. editore, Milano 2003
- [11] A. Clerici: *Tecnica dei pneumatici moto*, MotoTecnica vol. 17 N.9, N.P.M. editore, Milano 2003
- [12] R. Boyer, G. Welsch, E. W. Collings eds: *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys* - ASM International, Materials Park, OH, 1994.